

## 15. 학사논문 지도교수: 이 복 직

- 15-1. 하이브리드 컴퓨팅 아키텍처(CPU/GPU) 활용 HPC 연구
- 15-2. 압축성 반응유동 해석용 전산유체 수치기법 연구
- 15-3. 오픈폼(OpenFOAM)을 이용한 극초음속 추진해석 연구
- 15-4. 열음향 연소불안정 예측 및 분석 연구
- 15-5. 난류 예혼합화염 한계거동 연구
- 15-6. 화염의 전기장 제어 연구
- 15-7. 저선회 가스터빈 연소특성 및 난류생성판 해석 연구
- 15-8. 초임계(Supercritical) 유체 및 연소 특성 연구
- 15-9. 달탐사체 적용 추진제 연구
- 15-10. 캔위성(CanSat) 제작 및 운용 연구
- 15-11. 기계학습을 이용한 별 센서 알고리즘 개발

교수 연락처: 301동 1304호, 880-7415, [b.lee@snu.ac.kr](mailto:b.lee@snu.ac.kr)

항공우주추진연구실 (Aerospace Propulsion Laboratory) 301동 1313호, 1355-2호

<http://apl.snu.ac.kr> ('19. 03월 중 오픈 예정)

담당 조교: 구성열 박사 ([seongyeol.goo@snu.ac.kr](mailto:seongyeol.goo@snu.ac.kr))

## 15-1. 하이브리드 컴퓨팅 아키텍처(CPU/GPU) 활용 HPC 연구

**[배경]** 최근 고성능 계산과학(High Performance Computing)에서 하이브리드 컴퓨팅 아키텍처(CPU-GPU, Multicore-Manycore 등)가 종래의 CPU클러스터의 성능 한계를 뛰어 넘는 하드웨어 개념으로 자리잡고 있다.

**[문제점]** 전산유체역학, 전산구조역학, 분자역학 등 막대한 계산비용으로 슈퍼컴퓨터를 이용해야 하는 분야에서, 슈퍼컴퓨팅 아키텍처 자체가 급변함에 따라 과학자/공학자가 매번 새로운 프로그래밍 언어(예: CUDA, OpenACC 등)를 학습하고 기존 코드를 전면 수정해야 하는 상황에 놓여 있다.

**[솔루션]** 과학자/공학자가 본래의 연구목적 프로그래밍 및 모델링 연구에 집중할 수 있도록, 컴퓨팅 아키텍처에 따른 병렬 프로그램을 자동으로 구현해주면서 최적의 성능을 보장하는 Kokkos 라이브러리가 미국 Sandia National Lab 주도하에 개발되었다.

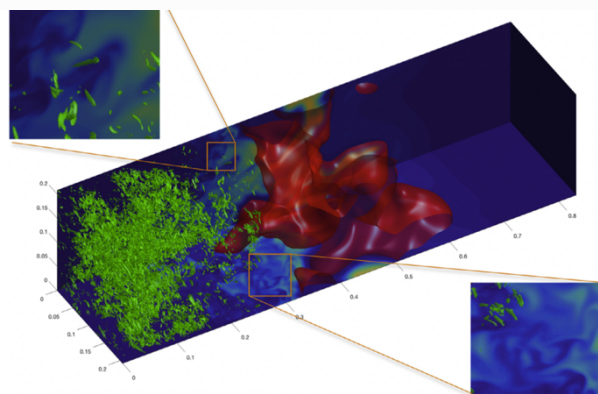
### [임무/주제]

- Kokkos를 활용한 1차원 Euler 방정식 (반응/비반응) 전산유체코드 개발
- Kokkos를 활용한 3차원 반응유동 DNS 전산유체코드 운용 및 성능 측정

### [획득역량 및 주안점]

- C++ 프로그래밍, Linux, 슈퍼컴퓨팅 환경 이해
- GPU컴퓨팅 (AI/Data Science 등)
- Computational Scientist 역량 개발

```
#include <Kokkos_Core.hpp>
int main(int argc, char** argv) {
    /* ... do any necessary setup (e.g., initialize MPI) ... */
    Kokkos::initialize(argc, argv);
    /* ... do computations ... */
    Kokkos::finalize();
    return 0;
}
```



## 15-2. 압축성 반응유동 해석용 전산유체 수치기법 연구

**[배경]** 스크램제트 극초음속 추진기관, 지구 및 행성 재진입 등의 극초음속 현상 등은 강한 충격파와 고온 기체 반응을 수반한다. 실험으로 현상을 계측하기 매우 어려운 분야로서, 고신뢰도의 수치해석 기법이 반드시 필요하다.

**[문제점]** 충격파를 강건하게 포착하는 전통적인 압축성 전산유체 요구사항과 함께, 연소 또는 기체 해리, 이온화 등 기체 반응을 다루어야 한다. 이때 유체역학의 타임스케일과 분자반응의 타임스케일도 다르고, 각 반응의 속도도 큰 차이가 있어, 전체 시스템은 매우 Stiff하고 계산비용이 급격하게 증가한다.

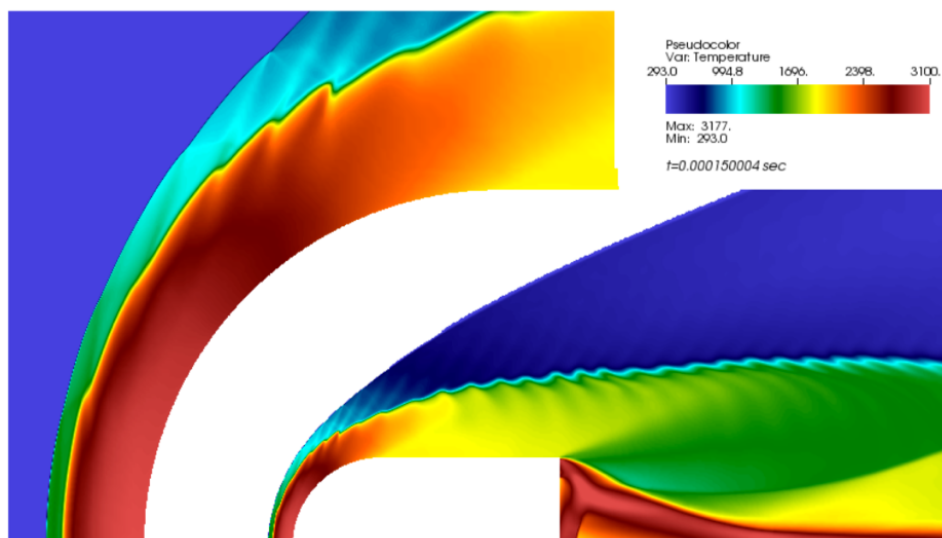
**[솔루션]** 수십~수백 화학종을 다루는 소스항 적분을 가속한다. 이에는 주어진 계산비용을 GPU등을 활용하여 하드웨어 가속하는 안과, 알고리즘을 개선하여 계산 비용 자체를 줄이는 안이 있다.

### [임무/주제]

- Strang-splitting에서의 소스항 적분 GPU 가속
- Strang-splitting에서의 소스항 적분 알고리즘 적용 (ERENA)

### [획득역량 및 주안점]

- Fortran 프로그래밍, Linux, 슈퍼컴퓨팅 환경 이해
- 항공우주/국방 관련 첨단 수치해석 부문
- 반응유동 해석코드 기초적 이해 함양 및 수치기법 연구 플랫폼 확보



### 15-3. 오픈폼(OpenFOAM)을 이용한 극초음속 추진해석 연구

[배경] 스크램제트 극초음속 추진기관, 지구 및 행성 재진입 등의 극초음속 현상 등은 강한 충격파와 고온 기체 반응을 수반한다. 실험으로 현상을 계측하기 매우 어려운 분야로서, 고신뢰도의 수치해석 기법이 반드시 필요하다.

[문제점] 기존 연구용 해석코드들은 물리적 모델링에 집중하여 실제 3차원 형상의 추진기관, 연료주입구 등의 실제적 형상을 모델링하고 다루는데 부족하다. 비정렬격자계를 기반으로 3차원 형상을 자유롭게 적용할 수 있으면서도, 물리적 모델링을 모두 탑재한 코드가 필요하다.

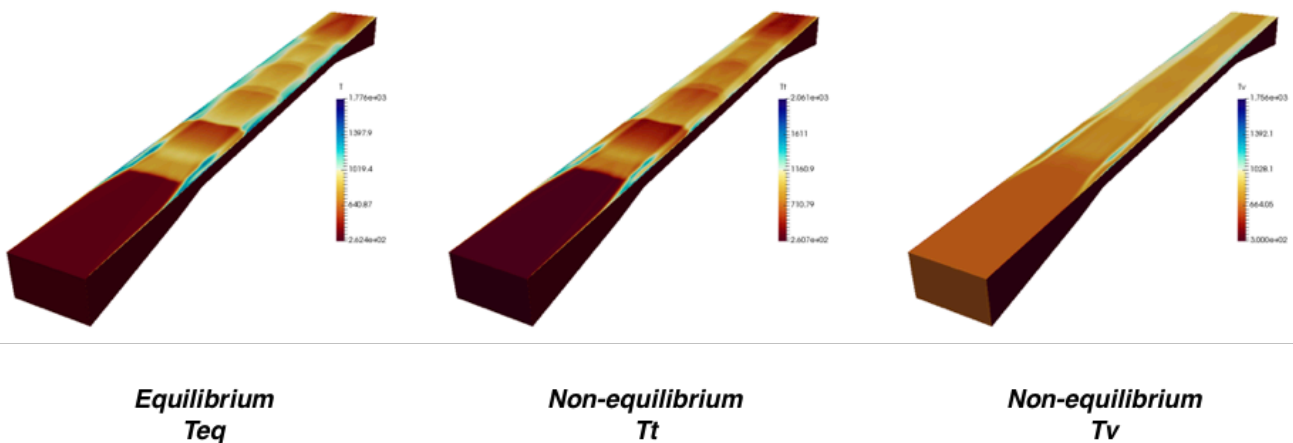
[솔루션] 비정렬 격자를 기반으로 하는 오픈소스 유한체적 코드 개발 라이브러리인 오픈폼(OpenFOAM)을 이용하여 극초음속 추진기관을 위한 압축성 반응유동 3차원 해석 코드를 개발한다.

#### [임무/주제]

- 압축성 압력기반 반응유동 오픈폼 솔버 개발 (열화학 비평형 모델 탑재)
- 압축성 밀도기반 반응유동 오픈폼 솔버 개발 (열화학 비평형 모델 탑재)

#### [획득역량 및 주안점]

- 오픈폼 프로그래밍, Linux, 슈퍼컴퓨팅 환경 이해
- 항공우주/국방 관련 첨단 수치해석 부문



## 15-4. 열음향 연소불안정 예측 및 분석 연구

[배경] 추진기관, 발사체, 가스터빈 등 챔버 내에서 연소가 일어나는 거의 모든 시스템에서 압력 섭동을 수반하는 열음향 연소불안정 현상의 발생가능성이 잠재한다.

[문제점] 연소 불안정에 의한 압력 섭동이 일정 수준을 넘어서면 시스템 전체를 파괴하는 매우 위험한 요소가 되고, 시스템의 개발과정 및 운용에서의 주요한 실패 원인이 되어왔다. (예: 항우연 발사체 추진기관 연소시험 중 폭발 등) 그러나, 연소 불안정은 아직까지 예측이 쉽지 않아 알려진 노하우를 이용하여 발생 가능성을 줄이는 설계를 하고, 발생할 경우 이를 회피하기 위한 설계변경을 수행하고 있다.

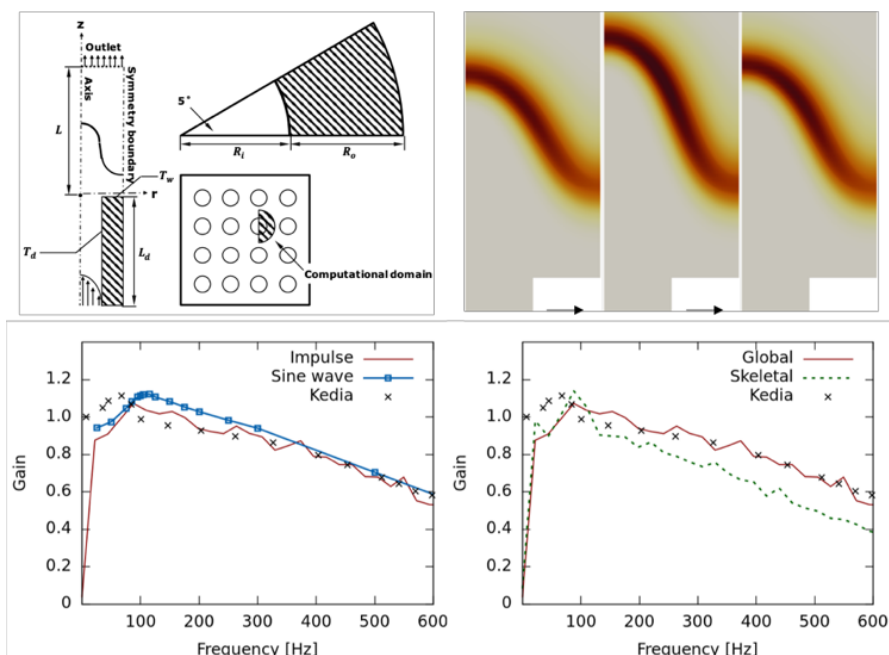
[솔루션] 궁극적으로 연소 환경, 조건 및 시스템 형상 등을 입력으로 하여 연소불안정 발생 가능 영역을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 이를 위해 열음향 연소불안정을 전산유체해석을 통해 연구하고, 모델링 하는 작업이 우선 요구된다.

### [임무/주제]

- 층류/난류 예혼합 및 확산 화염의 음향 가진하 거동 분석 및 모델링
- 층류/난류 예혼합 및 확산 화염의 자발 비정상 모드 포착 연구

### [획득역량 및 주안점]

- 오픈폼 반응유동 해석코드 운용 및 연소 해석 경험
- 연소현상 및 열음향 불안정의 수학적/물리화학적 이해



## 15-5. 난류 예혼합화염 한계거동 연구

[배경] 지상 발전 및 비행 추진에 적용되는 첨단 가스터빈은 환경문제 해결을 위해 연료 희박 조건에서 운용한다.

[문제점] 화염이 유지될 수 없는 연료 희박 한계가 존재하며, 연소 운용조건이 희박한계로 다가갈 수록 화염은 불안정 현상을 겪게 된다. 이때, 불안정 현상의 발생 기작과 희박 한계에서의 화염 거동에 대해 잘 알려져 있지 않으며, 안정적 연소 운용 조건 설계를 위해 이해가 필요하다.

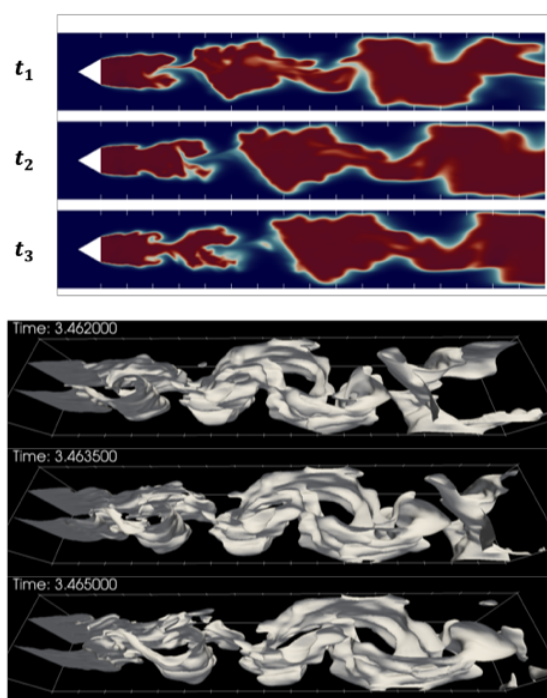
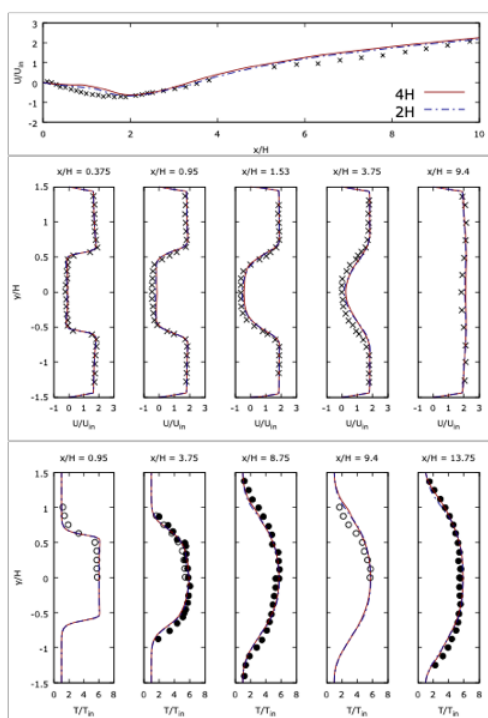
[솔루션] 고신뢰도 난류연소해석 코드를 적용하여 희박 한계에서의 화염거동을 포착한다. 이를 분석하여 화염의 한계조건 거동에 대한 모델을 수립하고, 화염 Blowoff의 한계가 무엇에 의해 결정되는지 물리적인 설명을 도출한다.

### [임무/주제]

- 난류 예혼합 화염 한계거동 수치해석
- 화염 불안정 모드 분석 (DMD 등)

### [획득역량 및 주안점]

- 오픈폼 운용, Linux, 슈퍼컴퓨팅 환경 이해
- 난류 연소 해석 경험 및 연소 현상 이해



## 15-6. 화염의 전기장 제어 연구

[배경] 연소 또는 화염과 전기장 사이의 상호작용에 대해 오래전 부터 알려져 있으며, 화염에 전기장을 인가하면 이온풍(Ionic Wind)라고 불리는 현상이 관찰된다.

[문제점] 지금까지 화염의 이온풍은 흥미위주의 관찰에 그쳐 있으며, 고신뢰도 수치적 모델링 기법이 거의 개발되지 않았고, 화염과 전기장의 상호작용에 대한 이해 및 활용방안에 대한 연구는 매우 초보적 단계에 있다. 연소불안정에 대해서 아직까지는 형상 변경, 연소조건 변경 등 수동적인 해결책만 갖고 있는데, 전기장 등 외력을 이용하여 제어하는 방법이 가능할지는 알려진 바 없다.

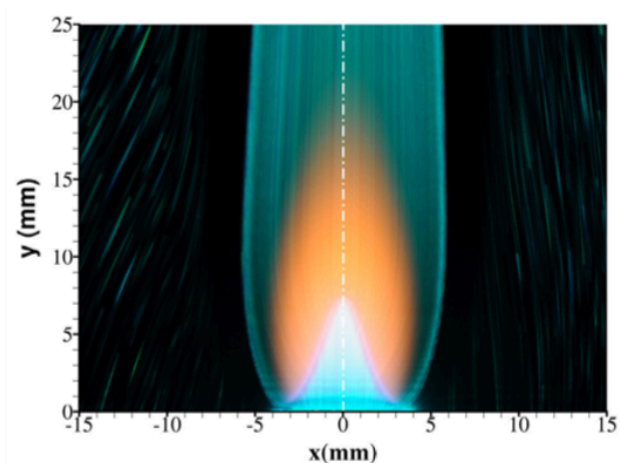
[솔루션] 본 연구실에서 개발된 화염-이온-전기장 해석 코드를 이용하여, 화염과 전기장의 상호작용을 이해하고, 전기장을 이용해서 연소불안정을 제어하는 기술을 개발할 원천 연구를 수행한다.

### [임무/주제]

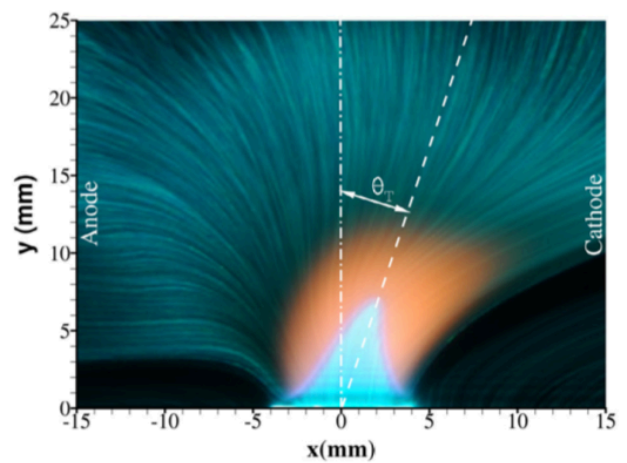
- 전기장 하에서 관내 층류 예혼합 화염의 음향가진 수치해석
- 관내 층류 예혼합 화염 (Rijke Tube) 전기장 제어 실험

### [획득역량 및 주안점]

- 연소의 플라즈마 특성 및 전기장 상호 작용에 대한 물리적 이해
- 연소불안정 제어 novel 기술 추구



= 0 kV



= -16 kV



## 15-7. 저선회 가스터빈 연소특성 및 난류생성판 해석 연구

**[배경]** 화석연료 기반 발전 생태계는 연소배출물로 인한 환경문제를 완화하기 위해 석탄 화력의 비중을 대폭 줄여가고 있으며, 이를 대체할 천연가스를 이용한 가스터빈 발전 수요가 증가하고 있다.

**[문제점]** 종래의 가스터빈 연소기는 화염 안정화를 위해 둔체를 활용하여 화염으로부터의 열전달로 인한 재료 열화가 나타난다. 또한 내부 재순환 영역에서 잔류 시간이 길어진 연소유동에서는 질소산화물 발생이 유리해진다.

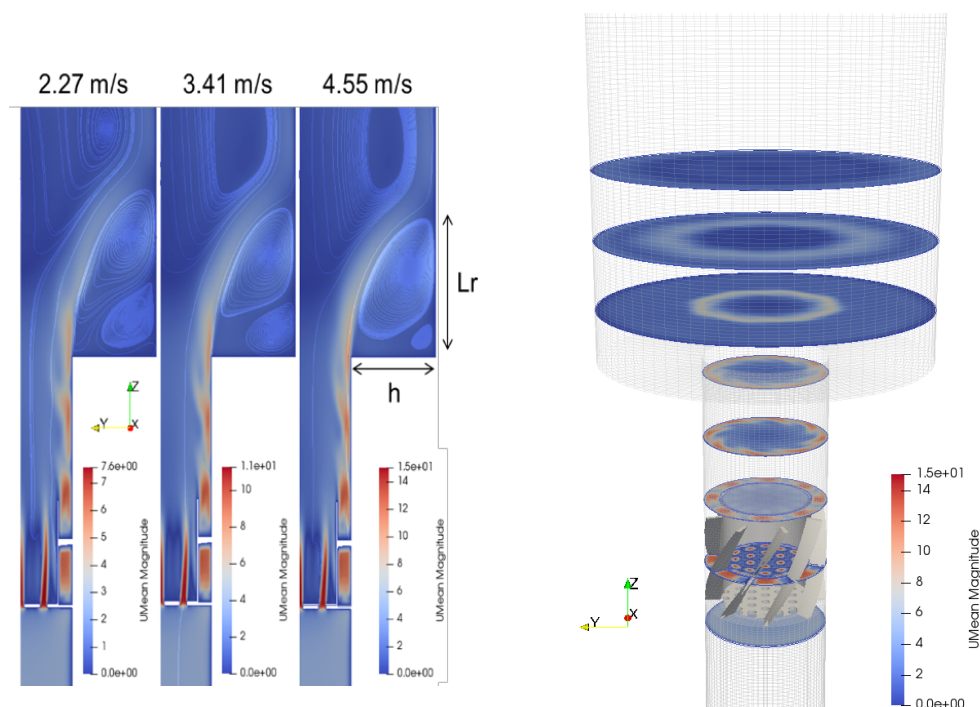
**[솔루션]** 미국을 중심으로 저선회 연소기 개념이 주창되었고, 이는 내부재순환 영역을 없애 질소산화물을 저감하고, 안정한 부상화염을 유지하여 재료의 열화 또한 감소시킬 수 있는 미래 기술이다. 이를 차세대 H급 가스터빈에 적용하기 위한 국내 원천기술 연구가 진행되고 있다.

### [임무/주제]

- 저선회 가스터빈 연소 수치해석 및 연소 안정한계 연구
- 난류생성판 프랙탈에 따른 비반응/반응 유동 특성 및 최적 프랙탈 형상 도출

### [획득역량 및 주안점]

- 오픈폼 운용, Linux, 슈퍼컴퓨팅 환경 이해
- 난류 유동 이해 및 난류-연소 상호작용 이해
- KIMM-KAIST-SCNU-KAMI 등 전문가 컨소시움의 공동연구 참여





## 15-8. 초임계(Supercritical) 유체 및 연소 특성 연구

**[배경]** 액체로켓 연소기, 그리고 최근 대두되고 있는 초임계 이산화탄소 발전기술, Allam power cycle 등은 모두 초임계 유체 현상을 수반한다. 초임계 유체는 여러 분야에서 사용된지 오래되었으나, 아직도 그 유체역학적 거동 및 반응에 미치는 영향 등은 깊이 이해되지 않은 영역에 해당한다.

**[문제점]** 초임계 조건에서의 유체 관찰 실험 (혼합, 경계층 발달 등) 및 연소 실험 등에 대한 데이터는 매우 희소하며, 관련 연구는 기초적 수준에 머물러 있다. 수치적 연구 또한 실제기체방정식과 열역학적 물성치, 전달 물성치 등을 완전히 새롭게 모델링하여야 하는 문제로 소수의 연구그룹에서만 다루고 있다.

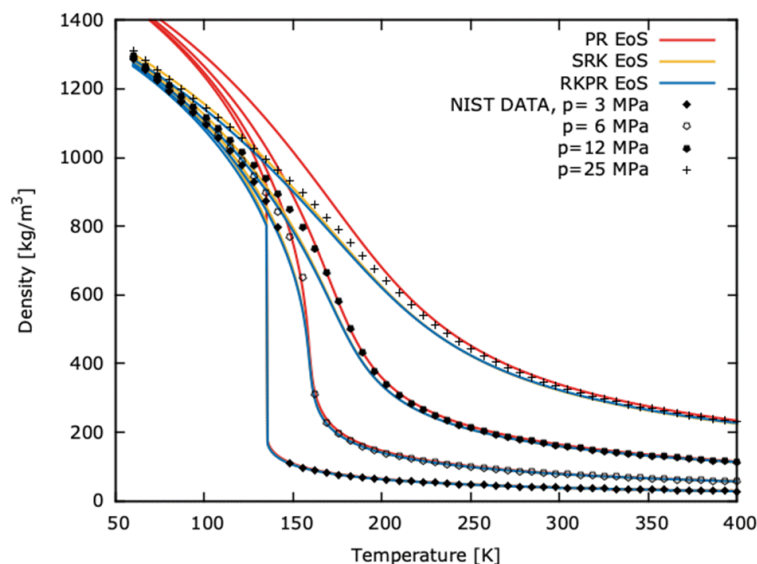
**[솔루션]** 초임계 유체의 거동 및 초임계 조건하에서 연소를 모사할 수 있는 실제기체 상태방정식 및 물성 모델을 적용하여, 직접모사(DNS) 코드를 구축한다. 이를 이용한 고신뢰도 수치 실험을 통해 경계층 문제, 혼합 문제, 연소 문제 등을 분석하고, 모델링의 근거가 될 기초자료를 제공한다.

### [임무/주제]

- 실제기체 모델 기반 압축성 직접모사 코드 개발
- 혼합 경계층, 벽면 경계층, 충격파관 문제, 대향류화염 등 주요 canonical configuration에 대한 초임계 조건 및 천이 영역(transcritical)에서의 수치해석

### [획득역량 및 주안점]

- 초임계 유체 및 연소 특성의 물리적 이해
- Fortran 프로그래밍, Linux, 슈퍼컴퓨팅 환경 이해



## 15-9. 달탐사체 적용 추진제 연구

**[배경]** 이원추진제는 높은 비추력과 다양한 추력성능을 제공하고 장시간 임무에 적합하여 위성체 및 발사체의 추진시스템에 널리 적용되고 있으며, 달탐사체의 추력기에도 적용할 유력 후보가 된다. 특히 MMH-NTO의 조합은 접촉 점화의 특성에 의한 설계의 단순화, 뛰어난 저장성, 적절한 비추력을 가져 실제 시스템에 많이 사용되고 있다.

**[문제점]** 달 탐사선의 경우 기존의 저궤도 및 정지궤도 위성과 달리 장거리 여정 및 주추진/역추진 등의 임무를 수행해야 하며, 이원추진제를 적용하는 것이 일반적이다. 우리나라의 이원추진제 추력기 관련 연구는 매우 미비한 실정인 탓에, 궤도 전이 및 자세제어용 이원추진기의 경우 해외로부터 수입에 의존하고 있다. 그러므로 이원추진제의 수치해석 및 모델링을 위한 체계 구축과 원천 기술 확보가 시급하다.

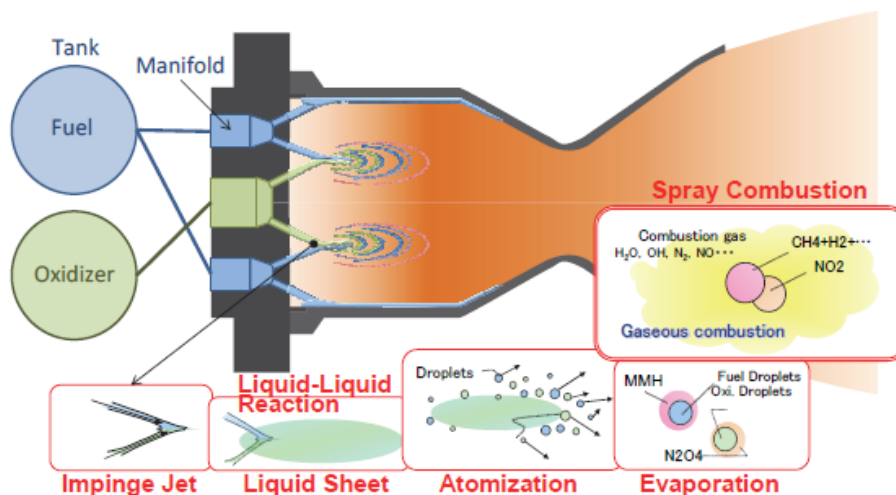
**[솔루션]** 본 연구에서는 선행연구 분석을 통해 MMH/NTO 이원추진제의 연소 해석에 필요한 자료를 확보하고, 연소의 특성을 파악할 수 있는 기초 연구를 수행한다. 이원추진제 수치 해석 및 모델링의 기반이 될 자료 구축 및 0-D, 1-D, 2-D 코드를 개발한다. 이를 통해 달탐사선에 적용할 이원추진제 추력기 설계의 원천 기술을 제공한다.

### [임무/주제]

- 이원추진제 추력기 리뷰 및 연구 동향 파악을 위한 자료 수집
- 이원추진제 0-D 및 1-D 연소모델링 구축

### [획득역량 및 주안점]

- 우주시스템의 미션 및 추진 기술에 대한 기초적 이해
- 이원추진제 추력기 연소연구 기반 마련



## 15-10. 캔위성(CanSat) 제작 및 운용 연구

**[배경]** 큐브위성은  $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$  크기의 초소형인공위성으로 적은 개발 비용 및 시간의 장점을 활용하여 기존 인공위성으로 수행하기 어려운 군집임무의 수행이 가능해졌다. 그 일례로 SNUSAT-1/1b는 QB50 프로젝트의 일환으로 36개 위성과 공동으로 지구 하부열권탐사 임무에 참여한 바 있다. 최근에는 큐브위성 관련 기술의 발전으로 고성능 큐브위성들이 등장하고 있으며 NASA에서는 최근 InSight 임무에 MarCO-A/B를 함께 보내 화성탐사임무에 큐브위성을 성공적으로 사용한 바 있다.

**[문제점]** 큐브위성 관련 기술은 약 20년에 걸쳐 개발되어 왔지만 시스템 실패가 기존 인공위성 대비 매우 높다. 상용부품(COTS, Commercial-Off-The-Shelf)과 자체 소프트웨어를 사용하기 때문에 우주에서 검증된 고가의 legacy 기술만 적용하는 통상의 위성보다 실패 리스크가 크다.

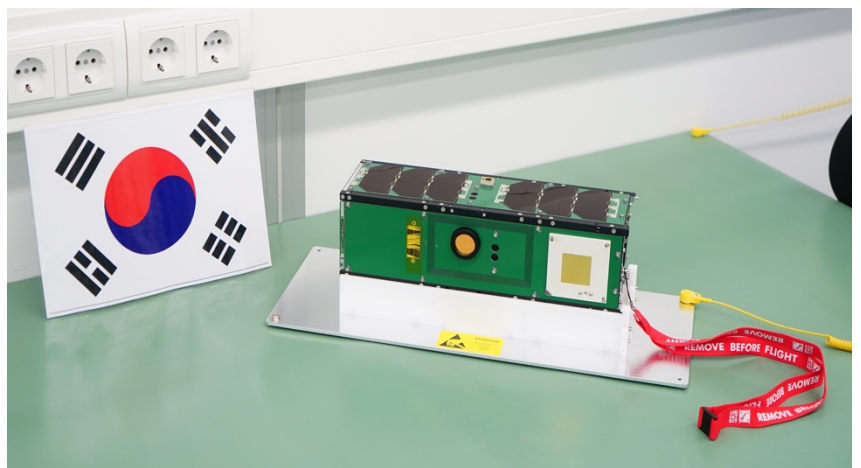
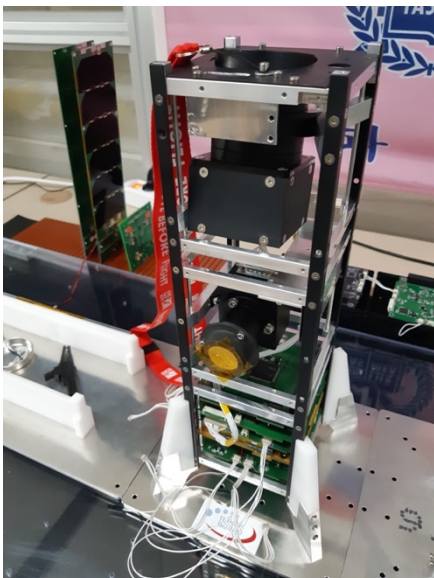
**[솔루션]** 캔위성(CanSat) 개발 및 운용을 통해 큐브위성 핵심 기술을 개발하고 시험한다. 특히 캔위성 개발 과정에서 우주시스템 전반에 대한 개발 및 운용을 통해 시스템의 문제점을 모색하고 해결한다.

### **[임무/주제]**

- 기존 인공위성 EM(Engineering Model) 기반 표준플랫폼 연구
- 별 센서 이미지 인식 학습을 위한 이미지를 대량 획득 임무(별 센서 이미지 압축) 설계
- 우주시스템의 기계학습 적용

### **[획득역량 및 주안점]**

- 마이크로 위성의 설계 제작 및 운용 경험, KARI 주관 대회 참가
- 우주 시스템 임무 설계 및 적용



## 15-11. 기계학습을 이용한 별 센서 (Star Tracker) 알고리즘 개발

**[배경]** 별 센서는 천체 이미지를 통해 위성의 현재 자세를 측정하여 위성 자세를 정밀제어하는 데 널리 사용된다.

**[문제점]** 별 센서 장착시 렌즈의 가공 및 장착 등 공차로 인해 알려진 천체 데이터베이스와는 다른 이미지를 얻게 되므로, 이를 제작사에서는 특정 노하우로 캘리브레이션 하여 고가에 판매한다. 또한 일부 관측데이터로 정확하게 어느 천체 영역을 보고 있는지 식별해내는 기술 또한 노하우에 해당한다.

**[솔루션]** 천체 이미지를 대량 획득하여, 천체 위치에 대한 데이터베이스를 근간으로 기계학습을 수행, 저품질 및 오차 포함 이미지로 부터 정확한 레퍼런스를 식별해내는 알고리즘을 개발한다.

### [임무/주제]

- 지상국 기반 Star Tracker를 이용한 이미지 획득 및 기계학습
- 학습용 이미지 획득 및 알고리즘 검증을 위한 캔셋(CanSat) 탑재체 개발

### [획득역량 및 주안점]

- 마이크로 위성 개발 참여
- 우주탑재체 및 우주비행체 운용 개념 학습 및 경험 축적
- 기계학습의 우주시스템 적용

